



Проект ТАНГРА - развитие и применение метода меченых нейтронов для изучения ядерных реакций и элементного анализа

Копач Ю.Н.
ЛНФ ОИЯИ

от имени коллаборации TANGRA



Проект TANGRA: Tagged Neutrons and Gamma-RAys

Участники:

1. Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia
2. Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR, Dubna, Russia
3. Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, Dubna, Russia
4. Laboratory of Radiation Biology, JINR, Dubna, Russia
5. Lomonosov Moscow State University, SINP, Moscow, Russia.
6. N.L. Dukhov All-Russian Automation Research Institute, Moscow, Russia.
7. Laboratory for Nuclear Analytical Methods, Institute Ruđer Bošković, Zagreb, Croatia
8. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
9. Banaras Hindu University, Varanasi, India
10. University of Alexandria, Egypt



Цели проекта

1. Фундаментальные исследования

Использование пучков меченых нейтронов для проведения измерений в области фундаментальной ядерной физики

- Исследование реакций неупругого рассеяния нейтронов $(n, n'\gamma)$ с использованием метода меченых нейтронов.
- Исследование реакций $(n, 2n')$, (n, n') с использованием метода меченых нейтронов.

2. Прикладные исследования

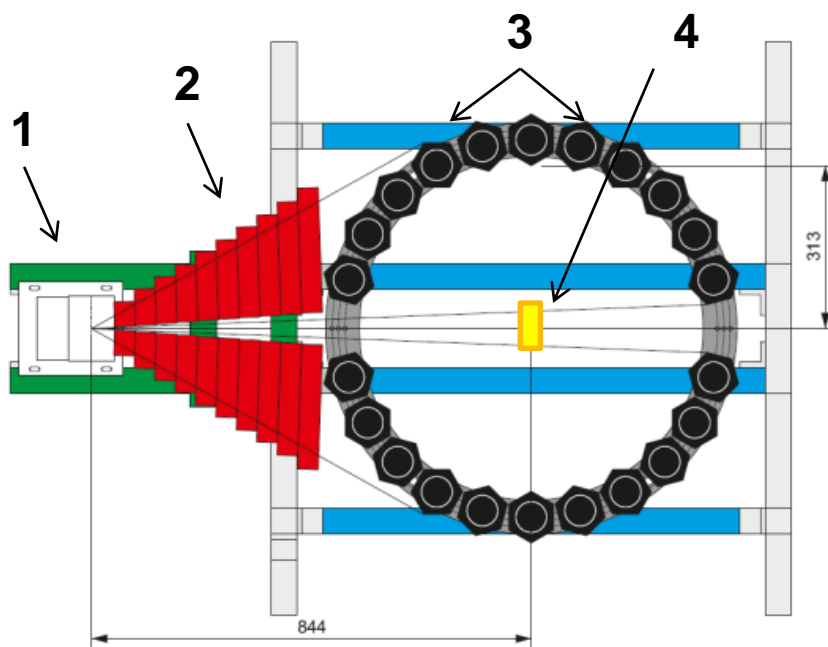
- Развитие и применение метода меченых нейтронов для неразрушающего анализа и идентификации более широкого класса элементов и веществ.
- Создание/развитие базы данных по сечениям реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами и характеристическим гамма-линиям.
- Разработка методики по исследованию элементного состава грунтов и минералов с целью определения содержания в них различных элементов

3. Методические исследования

- Разработка алгоритмов анализа экспериментальной информации, поступающей с детекторов нейтронного и гамма-излучений.
- Создание детекторов с улучшенными временными и энергетическими характеристиками для использования в интенсивных нейтронных полях.

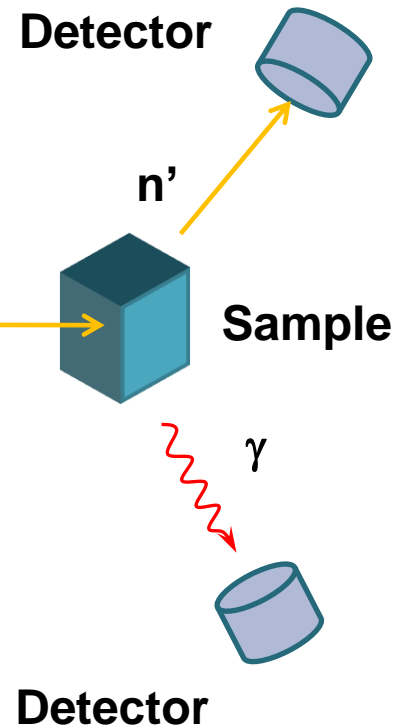
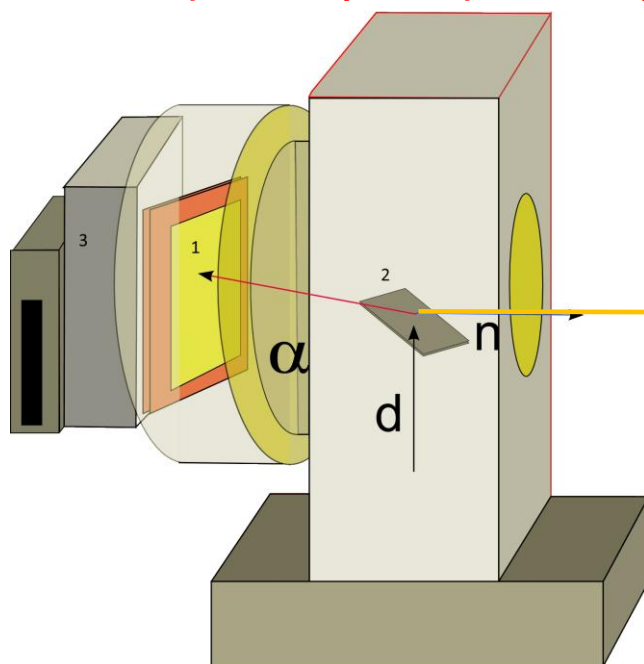


Основные компоненты установки TANGRA



1. Neutron generator with a position sensitive detector of α -particles
2. **Shielding (optional)**
3. Detectors of γ -rays / neutrons
4. Sample

Метод меченых нейтронов (ММН)

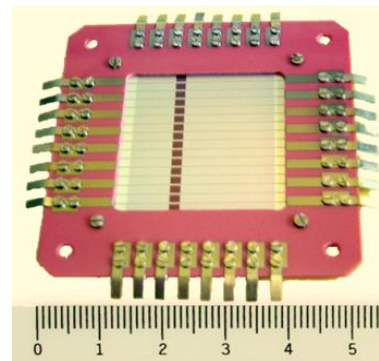


Neutron generator ING-27

Measured quantities:

- Pulse height (particle energy)
- Time-of-flight (n-gamma separation, background rejection)
- Pulse shape (n-gamma separation)
- Angle of emission of the incident neutron and secondary particle (neutron or gamma)

Нейтронный генератор ING-27



Produced by N.L. Dukhov All-Russian Automation Research Institute

Maximal intensity	$\sim 5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$
Neutron energy	14.1 МэВ
Neutron radiation mode	steady-state
Power supply	$200 \pm 5 \text{ V}$
Maximum power consumption	40 W
Dimensions	130x279x227 mm
Weight	8 kg
Operation time	$\sim 1000 \text{ hours}$
Detector of α -particles	9, 64 or 256-pixel position sensitive silicon detector

Основные преимущества ММН, используемые в проекте ТАНГРА

- Информация о пространственной и временной локализации взаимодействия нейтрона с образцом (X, Y – координаты задаются положением пикселей α -детектора; Z, t – координаты задаются временем пролета)
- Точное знание о количестве нейтронов, попадающих на мишень (каждый нейтрон «помечается» α -детектором)
- За счет отбора событий в интересующей нас пространственно-временной области существенно уменьшается фон
- Метод позволяет идентифицировать различные элементы по их характеристическим гамма-линиям

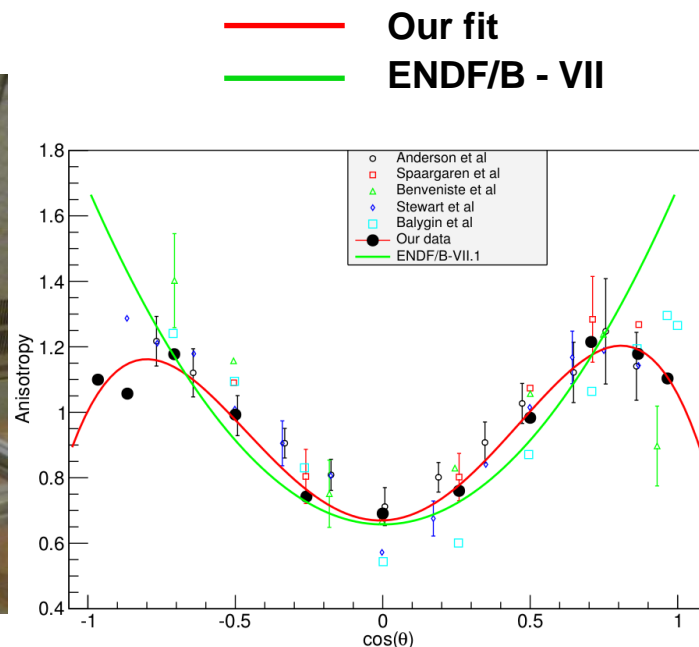
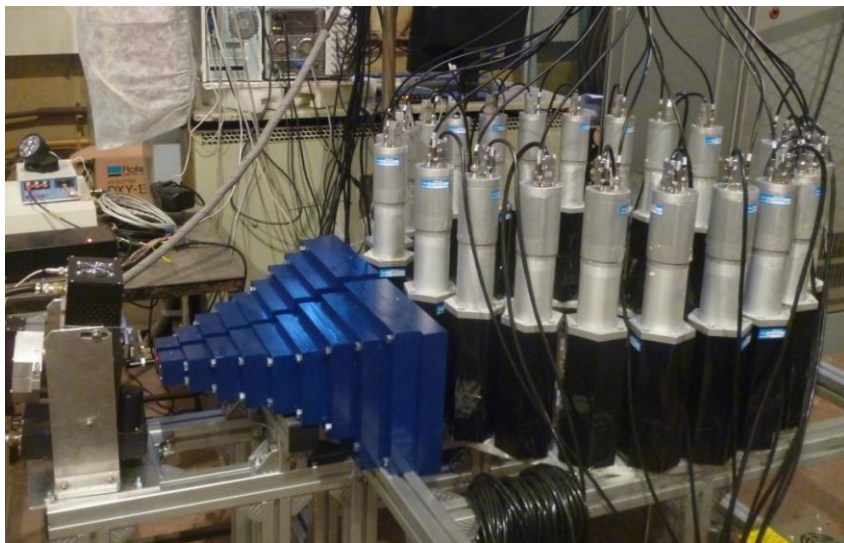




Первые эксперименты в проекте TANGRA

Измерение угловых распределений гамма-квантов с энергией 4.43 MeV в реакции $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)$

Reported at ISINN23



$$w \sim 1 + a \cdot \cos^2 \theta - b \cdot \cos^4 \theta$$

$$a = 2.47 \pm 0.1$$
$$b = 2.04 \pm 0.12$$

$$\text{Anderson et al:}$$
$$a = 1.75 \pm 0.18$$
$$b = 1.20 \pm 0.31$$

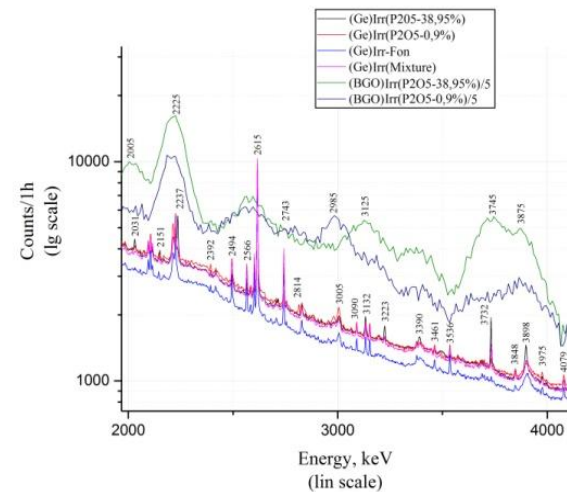
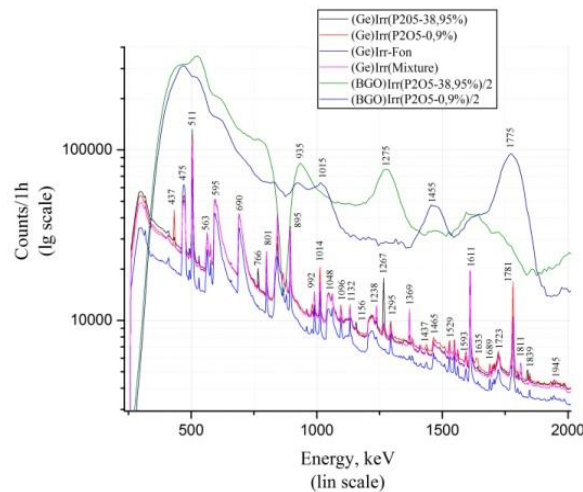
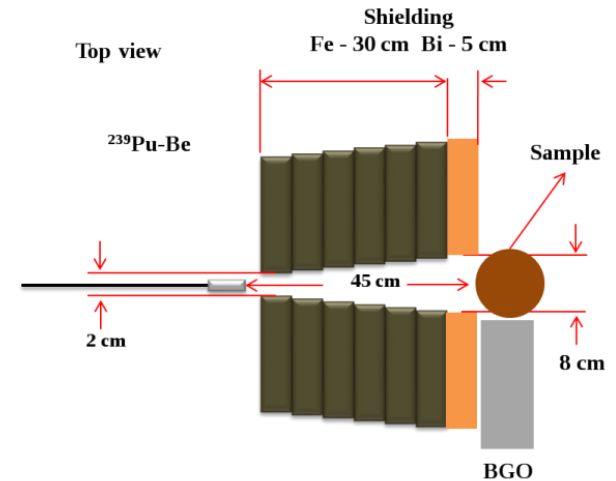
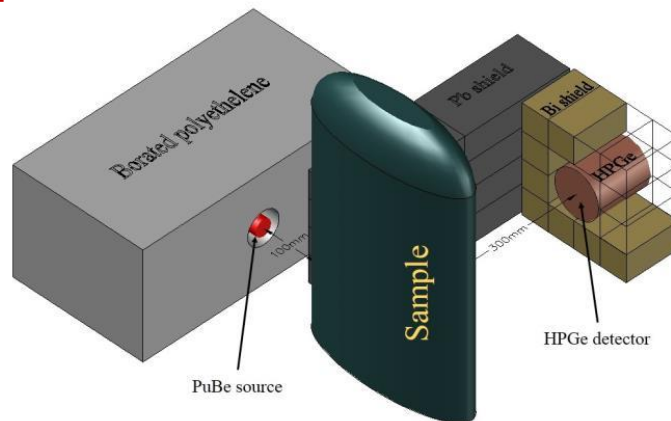
Yu.N. Kopatch et al, Reported at ISINN-23, Dubna (2015)

V. M. Bystritsky et al, Physics of Particles and Nuclei Letters (2016)

Прикладные работы в проекте TANGRA

Определение элементного состава сырой руды

Reported at ISINN24

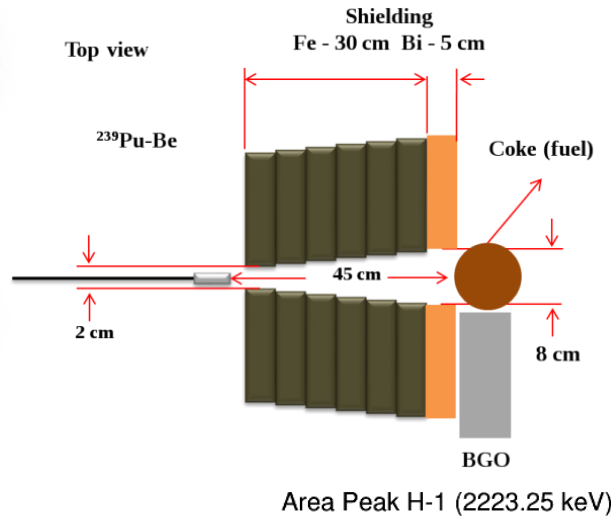


C.Hramco et al, ISINN-24 Dubna, May 24–27, 2016, JINR, E3-2017-8, p. 157

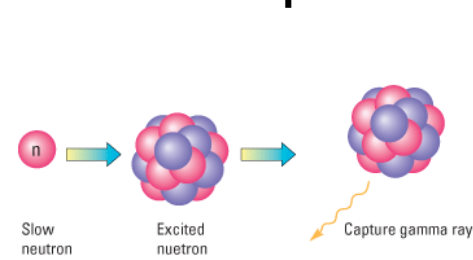
Прикладные работы в проекте TANGRA

Определение относительной влажности кокса

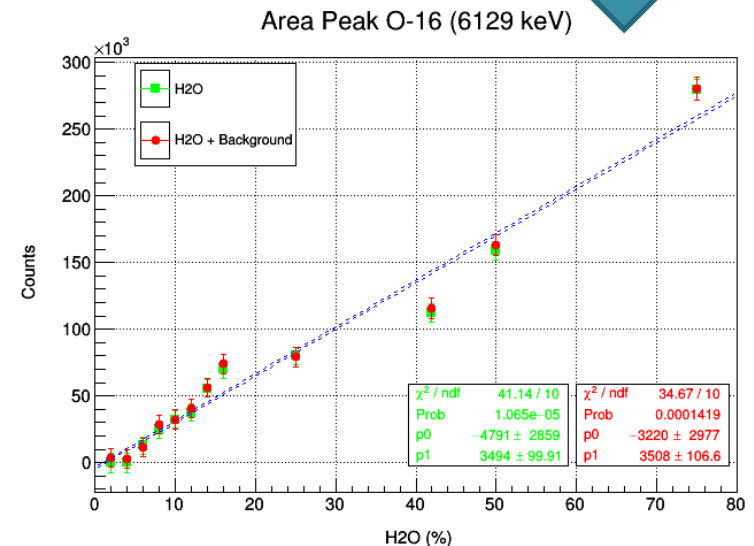
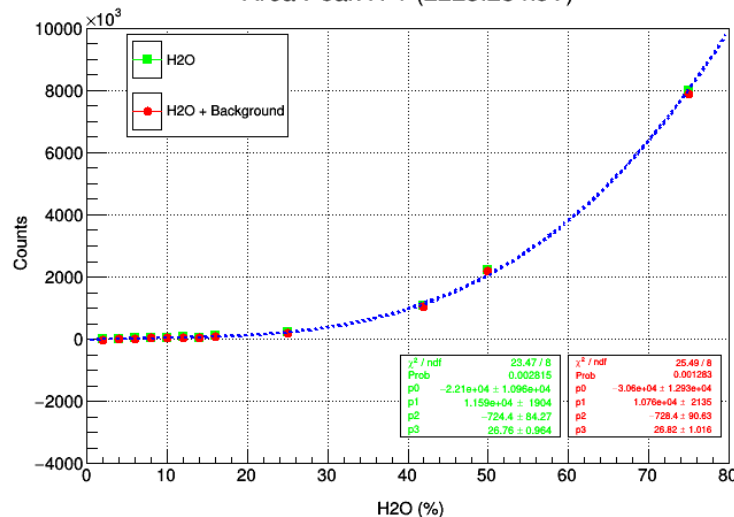
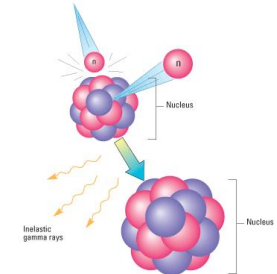
Reported at ISINN24



Neutron capture



Neutron inelastic scattering



D.Grozdanov et al., *Physics of Particles and Nuclei Letters* (2017)



Методические работы

Развитие цифровой электроники и систем накопления и анализа данных

ADCM-16



- 16/32/64-канальные оцифровщики в формате одной или нескольких PCI-E карт.
- Частота оцифровки 100 or 66 MHz
- Оцифрованные сигналы передаются через шину PCI-E в память компьютера; анализ данных происходит в ЦПУ компьютера.
- Максимальная загрузка системы ~ 10^5 событий в секунду

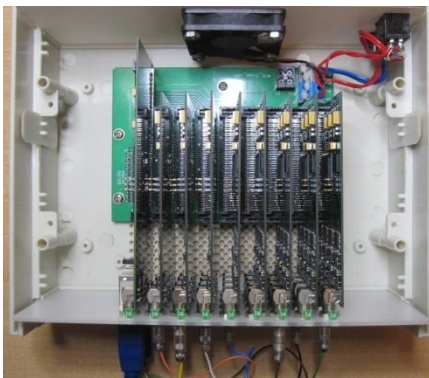


Методические работы

Развитие цифровой электроники и систем накопления и анализа данных (II)

32-канальный Цифровой Регистратор Сигналов (ЦРС-32):

1. Мини крейт 2. Одна управляющая плата 3. До 8 рабочих плат



- Рабочая плата: 4 независимых канала с частотой оцифровки 200 МГц и разрешением 11 бит.
- Может быть заменена на 2-канальную плату с частотой оцифровки 100 МГц и разрешением 16 бит.
- Передача данных – через USB-3.
- **Обработка сигналов происходит внутри ЦРС-32**
- Максимальная загрузка системы ~ 10^5 событий в секунду **по каждому каналу**

Методические работы

Разработка кремниевого 2-мерного позиционно-чувствительного детектора быстрых нейтронов для измерения профилей меченых пучков

2D detector, made of 4 double sided stripped position sensitive Si detectors

Each Si detector consists of 32x32 strips ~1.8 mm thick

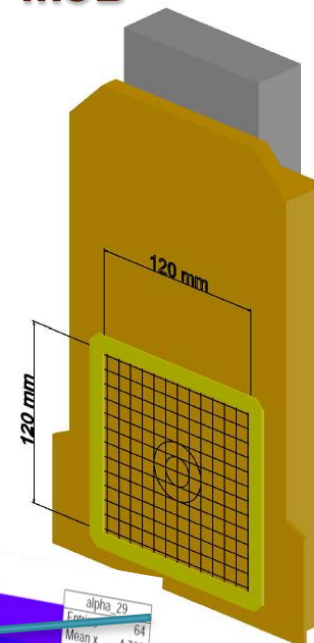
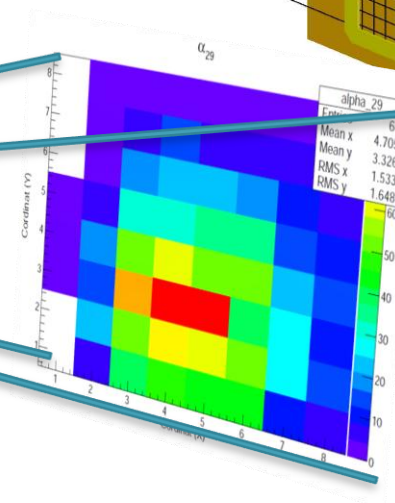
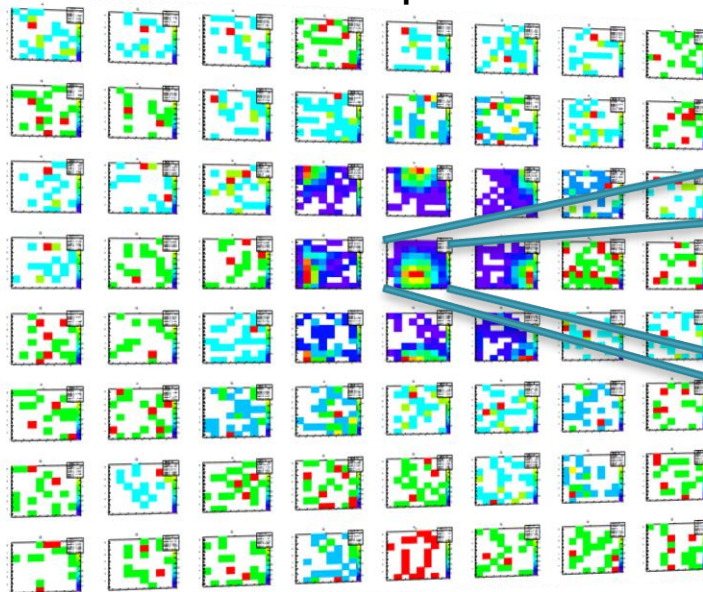
Size of one detector: 60x60mm

Total size: 120x120 mm

Thickness: 300 mkm

Neutron detection efficiency: ~0.8%

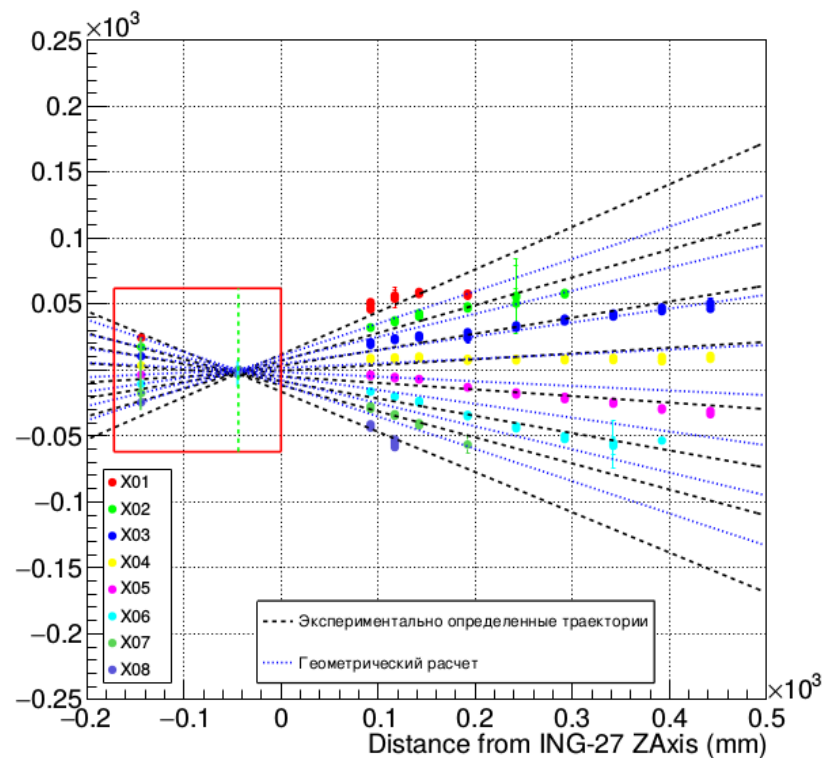
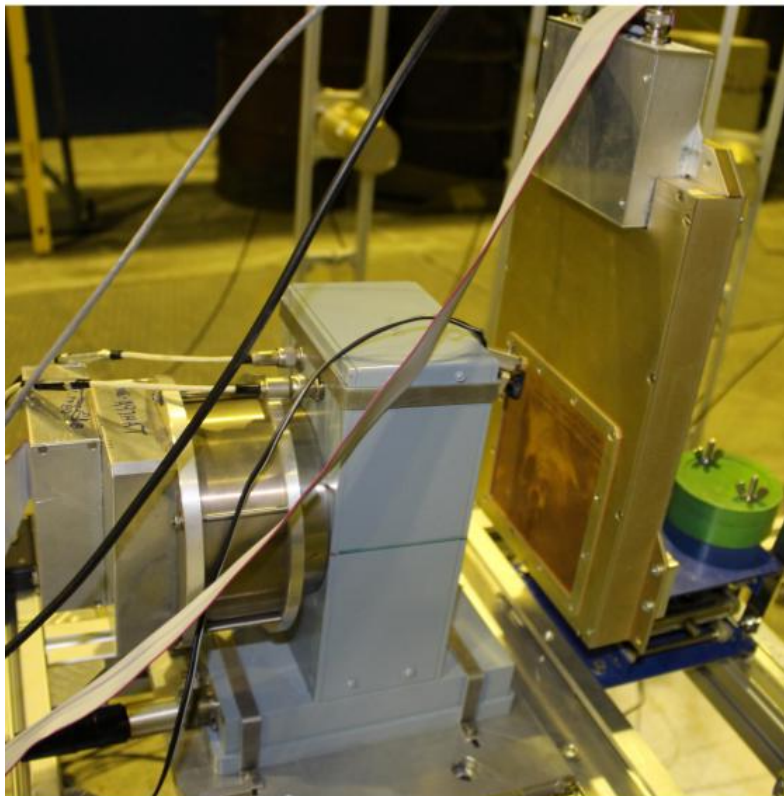
At this stage each 8 strips are grouped together forming a matrix 8x8 with a pixel size of ~1.5x1.5 cm



F.Aliev et al, Reported at SINN-25 Dubna, May 22–26 2017

Методические работы

Измерение профилей меченых пучков





Фундаментальные исследования в проекте TANGRA

Измерения угловых распределений и парциальных сечений вылета гамма-квантов в неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 MeV на различных ядрах

Основные задачи:

- Устранение имеющихся различий между экспериментальными и оцененными данными
- Для ряда ядер/гамма переходов угловые распределения не были измерены
- Исследование возможных различий между рассеянием протонов и нейтронов на ядрах
- Развитие комплексной теории угловых корреляций в реакциях неупругого рассеяния нейтронов
- Угловая анизотропия гамма-квантов должна быть учтена при использовании метода меченых нейтронов для элементного анализа

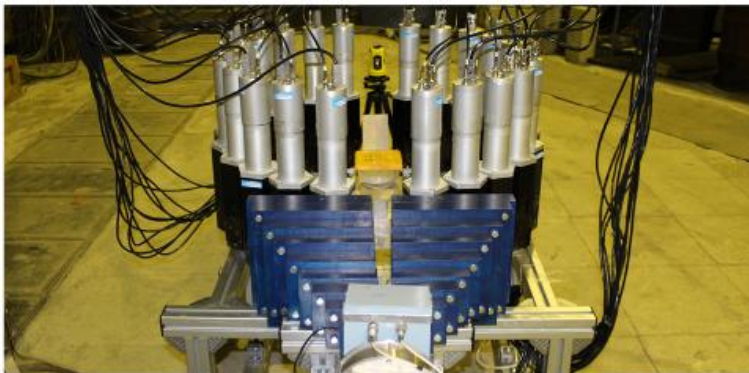




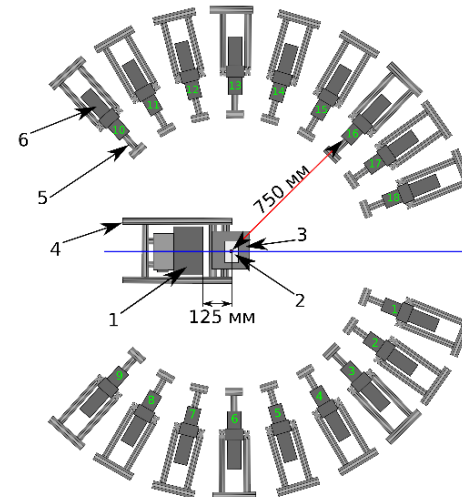
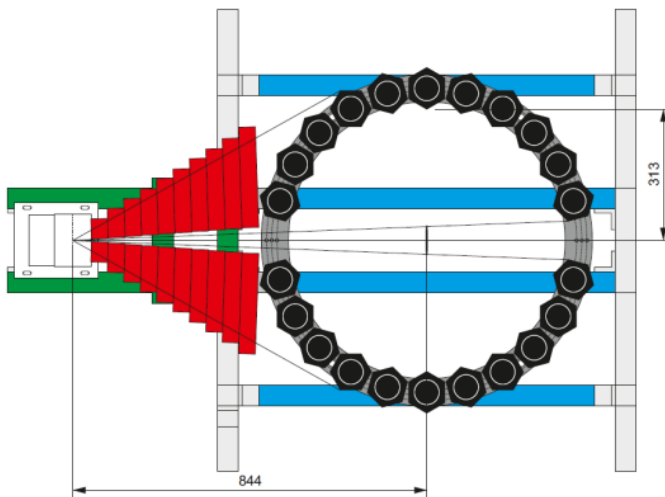
Две экспериментальные установки для измерения угловых корреляций гамма-квантов/нейтронов



Stage I: 22 NaI detectors



Stage II: 18 BGO detectors





Две экспериментальные установки для измерения угловых корреляций гамма-квантов/нейтронов



Образцы

Stage I:

Pb, C, Fe, Bi, Al, SiO₂, N

Расстояние до ИНГ-27: 850 мм

Размер - 100x100x50 мм

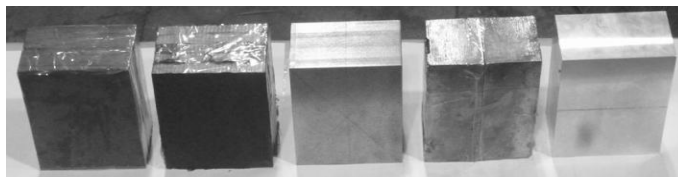
Облучается одним меченым пучком (соответствующим одному пикселю в альфа-детекторе)

Stage II:

Ti, Mg, Ca, Zn, Ni, Sn, KCl, NaCl, MnO₂

Расстояние до ИНГ-27: 125 мм

Размер – оптимизировался с помощью расчетов Monte Carlo с целью использования максимального количества меченых пучков и минимизации поправок на поглощение γ -квантов в мишени

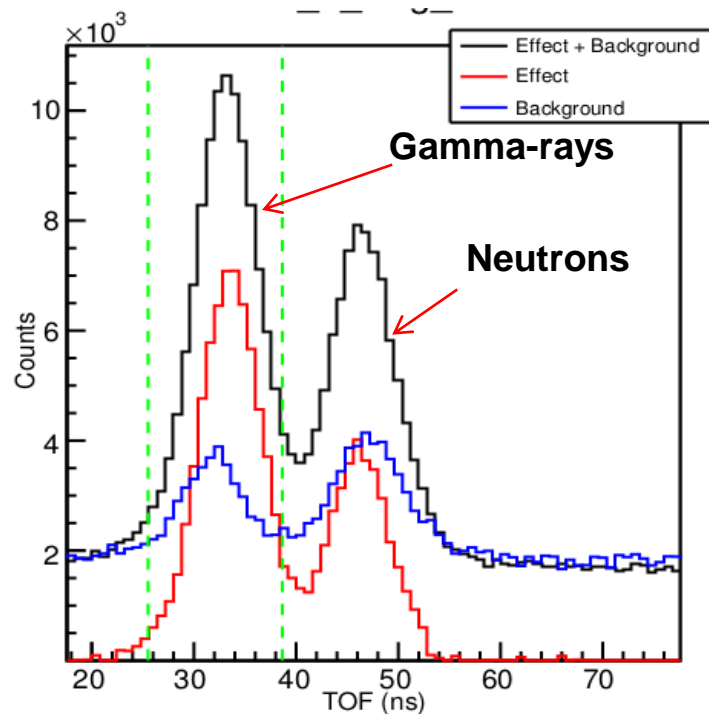
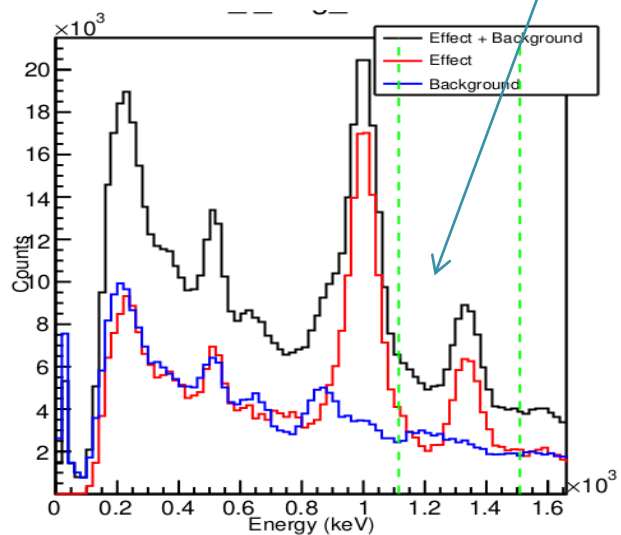
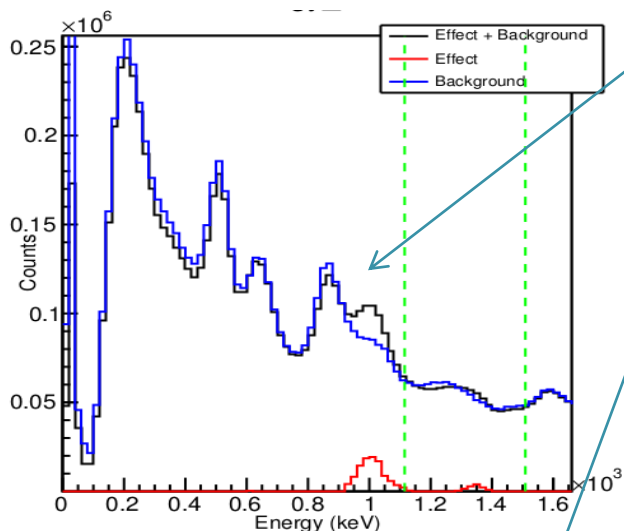


Энергетические и времяпролетные спектры из ВГО

Энергетические спектры от образца (черный), фона (голубой) и эффекта (образец минус фон – красный)

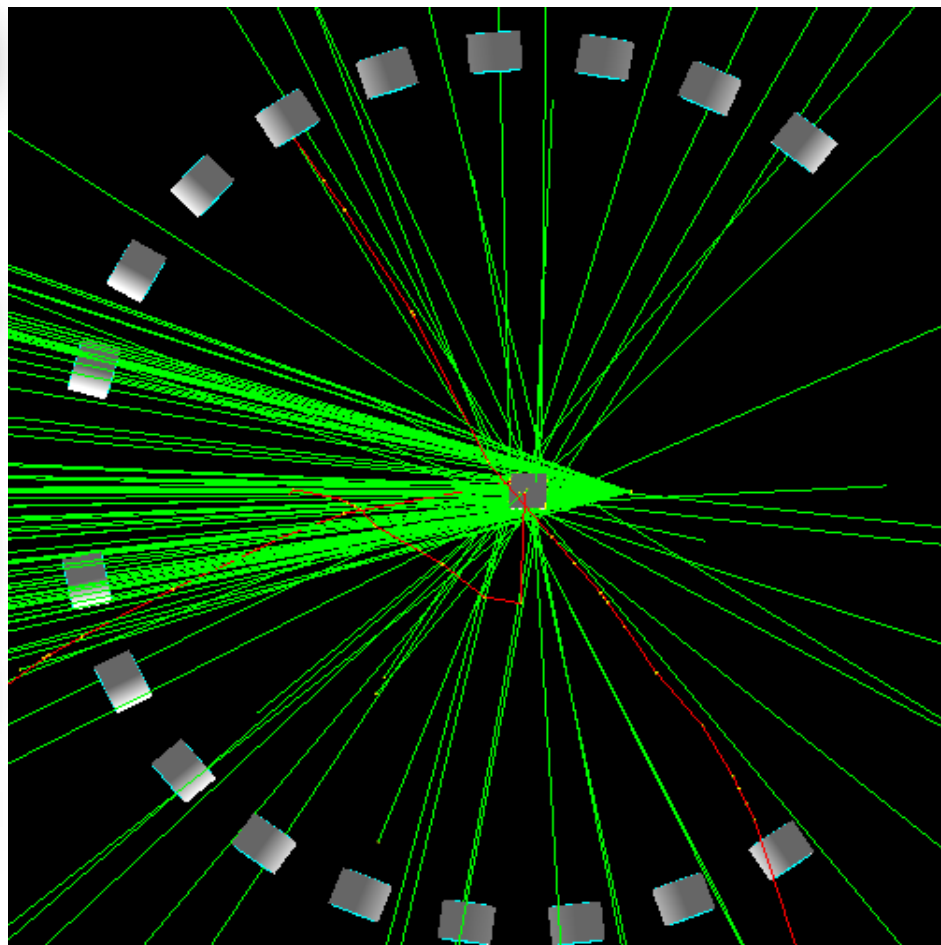
Аналогичные спектры в окне альфа-гамма совпадений

Временной спектр совпадений ВГО-альфа



TOF gate

Расчет поправок на поглощение гамма-квантов в образце с помощью программного пакета GEANT4



Гамма-кванты поглощаются при прохождении через слой образца.

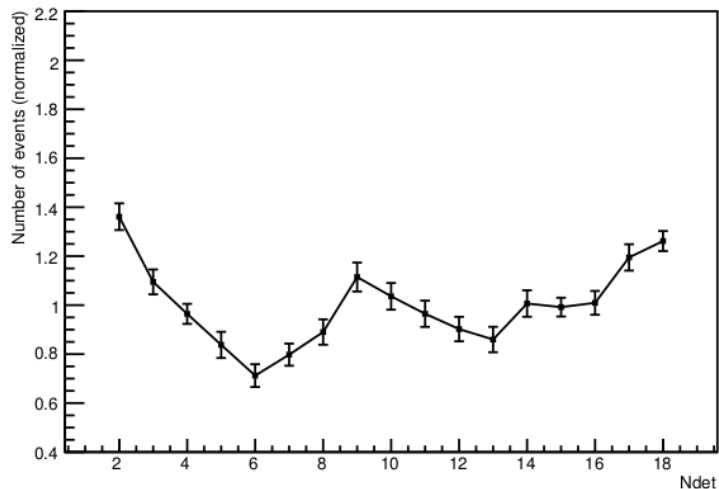
Величина коэффициента поглощения меняется в зависимости от направления меченого пучка и положения гамма-детектора.

Поправки на поглощение были рассчитаны с помощью пакета GEANT4.

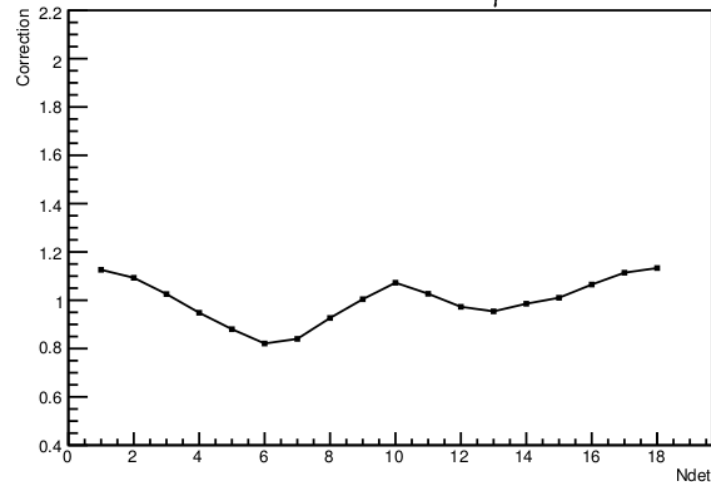


Учет поправок в экспериментальных данных

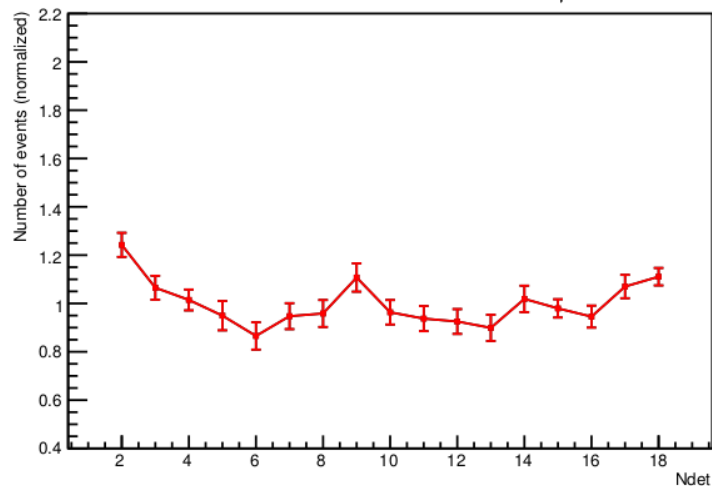
Experimental angular distribution for strip x04 $E_\gamma = 1775.0$



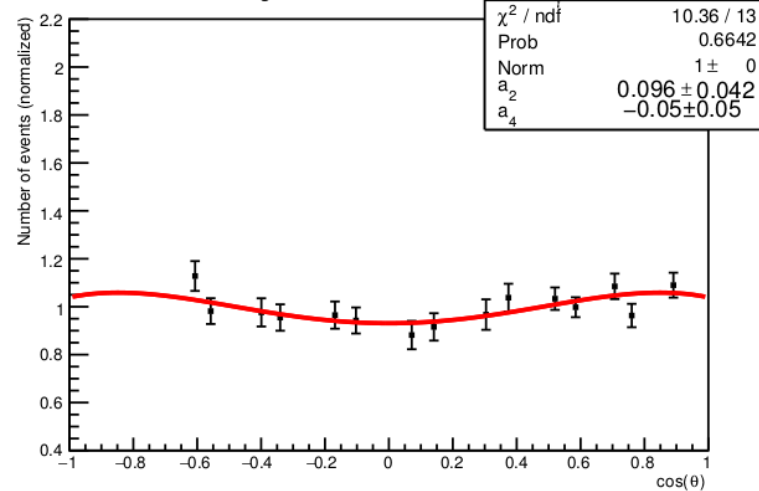
Correction for strip x04 $E_\gamma = 1775.0$



Corrected angular distribution for strip x04 $E_\gamma = 1775.0$

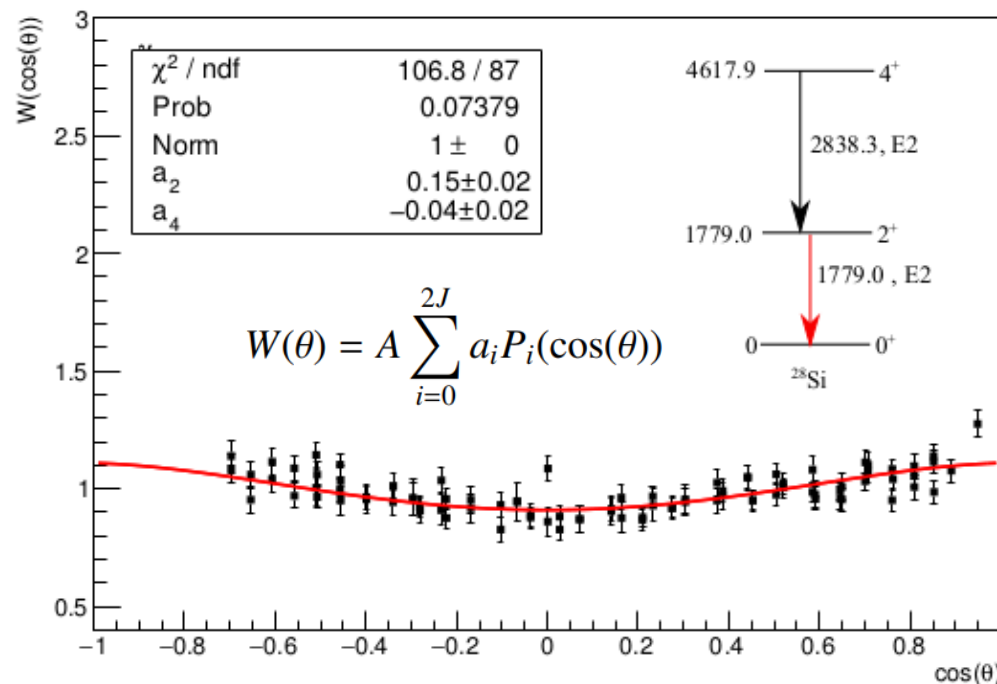


Corrected angular distribution for strip x04 $E_\gamma = 1775.0$



Угловые распределения для ^{28}Si

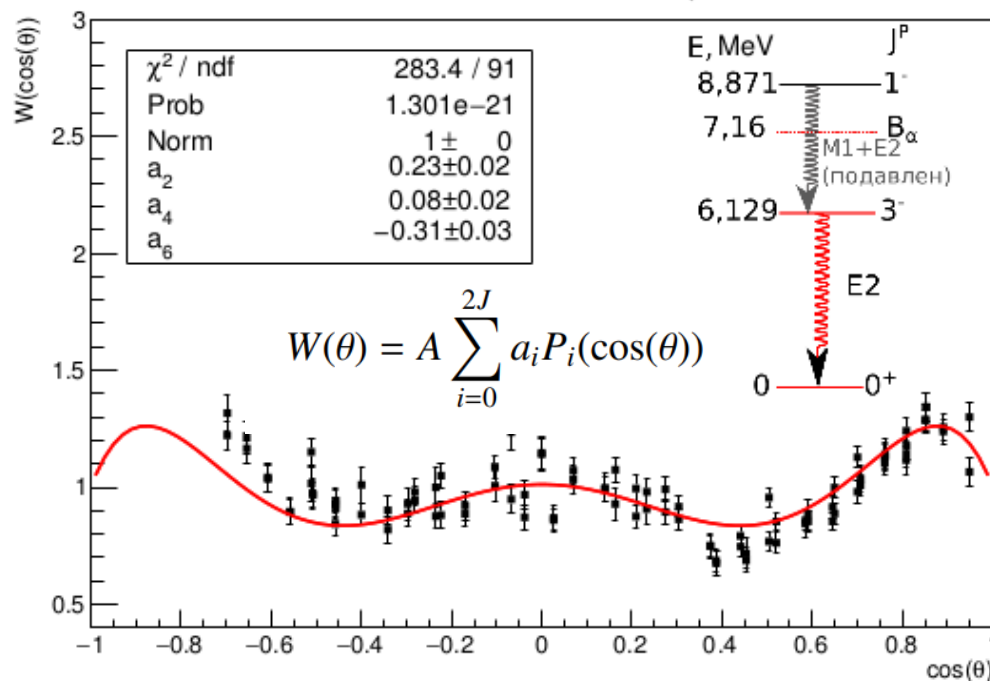
Angular distribution for $E_\gamma=1775.0$ keV



Experiment	a_2	a_4
Abbondanno (original)	0.16	0.02
Abbondanno (our fit)	0.2 ± 0.09	0.11 ± 0.14
Zhou (original)	0.21 ± 0.02	—
Zhou (our fit)	0.17 ± 0.14	-0.05 ± 0.16
«Romashka-BGO»	0.15 ± 0.02	-0.04 ± 0.02

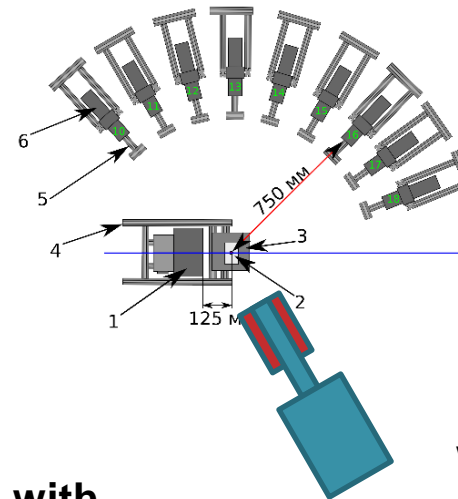
Угловые распределения для ^{16}O

Angular distribution for $E_\gamma=6125.0$



Experiment	α_2	α_4	α_6
Kozlowski (our fit)	0.18 ± 0.33	-0.2 ± 0.5	-0.7 ± 0.5
Morgan (our fit)	0.34 ± 0.04	0.012 ± 0.06	-0.04 ± 0.06
«Romashka-BGO»	0.23 ± 0.02	0.08 ± 0.02	-0.31 ± 0.03

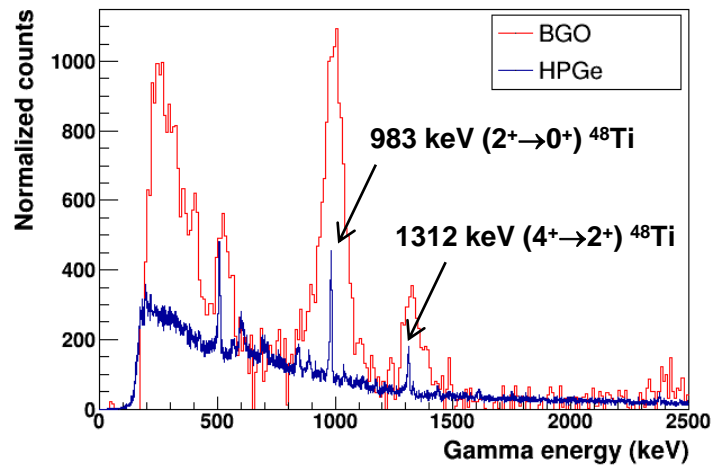
Измерение γ -квантов из неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ с помощью германиевого детектора (HPGe)



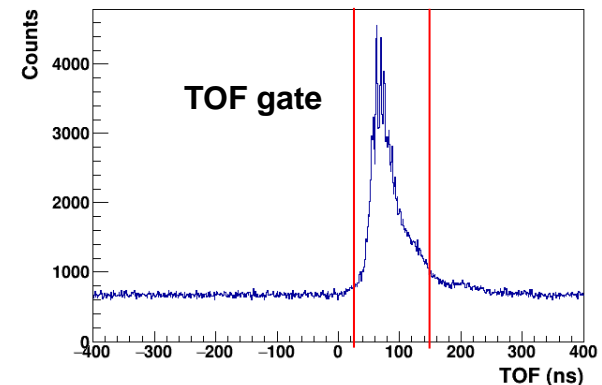
BGO detectors

HPGe detector with shielding

Energy spectra for $\text{Ti}(\text{nn}'\gamma)$ obtained with BGO and HPGe detectors using TNM



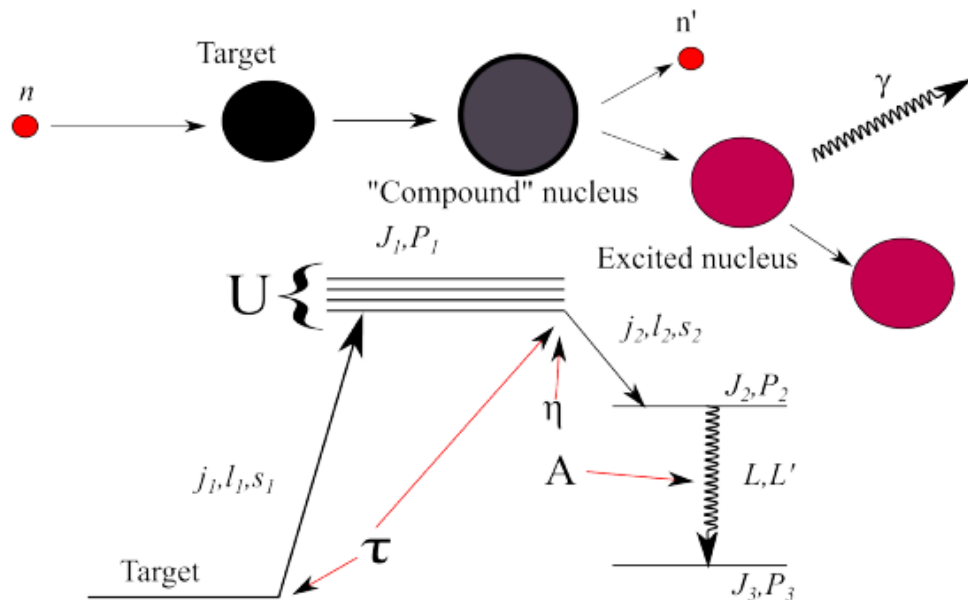
TOF spectrum from HPGe



Планы на будущее

Создание теоретической модели, описывающей угловые корреляции гамма-квантов и нейтронов в неупругом рассеянии

Calculation of the angular distribution of γ -quanta in the Compound Nucleus framework

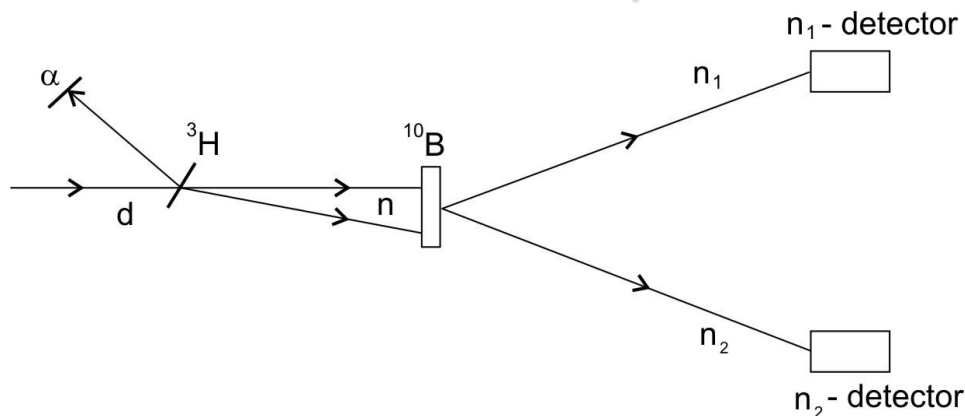


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{j_1, J_1, j_2, L', v} g\eta_v(j_1, j_1, J_0, J_1) \times \\ \times U_v(j_2, j_1, J_1, J_2) A_v(L, L', J_3, J_2) \tau P_v(\cos(\theta)) \quad (1)$$

- N.Fedorov, reported at ISINN-25, May 22-26 2017, Dubna
- N.Fedorov, Master Thesis, 2017

Планы на будущее

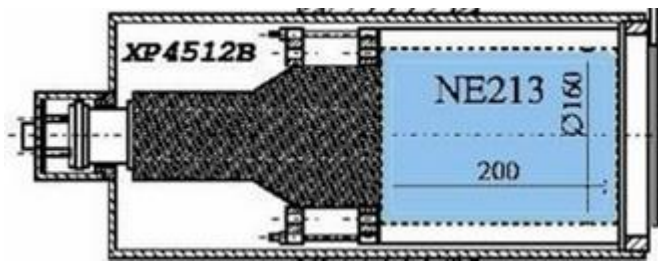
Исследование реакций $(n, 2n')$ и (n, n') методом меченых нейтронов



Investigation of the reaction $^{10}\text{B}(n, 2n)^9\text{B} \rightarrow p + ^8\text{Be}$.

Aim: *Obtaining information about the low-lying levels of the unstable nucleus ^9B*

Method: *Measurement of the energies of two neutrons using time of flight and calculation of missing-mass spectrum for ^9B .*



Using high efficiency DEMON detectors with n -gamma separation capability

Заключение

- Проект, нацеленный на применение ММН для экспериментальных исследований в области фундаментальной и прикладной физики, реализуется в ОИЯИ.
- В настоящее время на установке ТАНГРА ведутся эксперименты по измерению неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на различных ядрах.

В будущем планируется:

1. Проведение измерения характеристических гамма-квантов для различных элементов. Создание базы данных по выходам и угловым распределениям.
2. Измерение сечений реакций $(n, 2n)$, (n, n') на ядрах, важных с точки зрения ядерной астрофизики и ядерной энергетики.
3. Создание и развитие теоретических моделей для всестороннего описания взаимодействий быстрых нейтронов с ядрами.



Спасибо за внимание!

